第40卷 第4期
2023年4月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

祁连山南坡青海云杉林碳密度随海拔分布特征

邱巡巡[1,2]， 曹广超[2,3]， 张进虎[1,2]， 张 卓[4]， 刘梦琳[1,2]

（1. 青海师范大学地理科学学院，青海 西宁 810008；2. 青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海 西宁 810008；3. 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海 西宁 810008；4. 新疆维吾尔自治区克孜勒苏生态环境监测站，新疆 阿图什 845350）

摘 要：森林生物量是研究森林第一性生产力的基础，其碳密度是评价森林生态系统结构功能的重要指标。为探究祁连山南坡阿咪东索小流域内青海云杉典型林分密度随海拔的变化特征，按不同海拔，采用生物量模型计算法，选择海拔2900~3200 m调查分析该区域内青海云杉乔木层和土壤层碳密度沿海拔梯度的变化特征，以期为祁连山青海云杉林碳储量估算提供基础数据。结果表明：研究区总生物量平均值为135.59 t·hm^{-2}，随着海拔升高，总生物量呈递减的趋势。乔木层碳密度平均值为70.51 t·hm^{-2}，0~50 cm土层土壤有机碳密度平均值为154.01 t·hm^{-2}，随海拔升高，乔木层碳密度呈递减的趋势，土壤有机碳密度呈先降低后升高的变化趋势。区内不同海拔青海云杉林生态系统碳密度为224.51 t·hm^{-2}，其中乔木层和土壤层碳密度分别占总碳密度的30.5%和69.5%，随海拔上升呈下降的变化趋势。森林土壤碳库占比较大，加强对森林土壤的保护是维持森林生态平衡的强有力推进方向。

关键词：祁连山南坡；青海云杉林；生物量；碳密度

森林生态系统是陆地生态系统中主要的碳库[1]，占据着全球植被碳库的86%，土壤碳库的73%，如此巨大的碳库对维持全球碳平衡具有决定性作用，国内外学者对其碳库动态变化极为关注[2]。海拔作为一个极其复杂的环境因子，通过改变其水热条件等，直接或间接影响土壤理化性质[3]和植被分布[4]等因素，导致不同海拔土壤有机质的输入、分解发生变化，从而影响森林碳密度。此外，森林土壤有机碳是森林生态系统碳库的重要组成部分，也是反映林地土壤肥力的重要指标[5]，有研究表明，海拔变化对森林土壤有机碳积累有显著影响[6]，高海拔地区植被有机碳对气候变化响应更敏感[7]。迄今，已有众多学者基于海拔梯度的自然变化来研究森林的植被生物量及土壤有机碳含量，如熊华等[8]探究了梵净山不同森林植被生物量、碳储量及空间分布特征，得出当地森林植被生物量和碳储量等主要分布在海拔1201~1800 m的结论；秦艳培等[9]在黄河流域河南段对植被、土壤碳密度的研究结果表明该区域的植被、土壤及其有机碳密度在海拔梯度上呈现平原（<200 m）<丘陵（200~500 m）<低山（500~1000 m）<中山Ⅰ（1 000~1500 m）<中山Ⅱ（>1500 m）的空间分异特征；任德智等[10]对成都市森林植被碳储量的研究结果表明随海拔增加，森林植被碳储量总体呈以中海拔区域为最高倒“V”字形变化趋势；张彦军等[11]探究了秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局，发现海拔梯度对太白山北坡的有机碳密度影响显著。这些研究结果表明，海拔梯度对山地森林植被碳密度及其土壤有机碳含量的影响较大，但规律具有区域差异[12]。因此，利用海拔梯度的自然变化来了解青海云杉林碳库组成动态变化规律，对于当地森林区域碳平衡发展具有重要意义[13]。

祁连山是青藏高原东北部的高大山系，对我国西北部生态安全具有重要贡献，其垂直分异明显，是研究植被的理想区域[14]。青海云杉是祁连山林区主要的森林建群树种，具有明显的海拔分布依

收稿日期：2022-07-30； **修订日期：**2023-01-30
基金项目：青海省科技厅重大专项“青海省碳排放、碳吸收、碳中和关键技术研究”（2021-SF-A7-1）；青海省自然地理与环境过程重点实验室（2020-ZJ-Y06）；祁连山南坡青海云杉地表物层生态水文效应（2020-ZJ-725）
作者简介：邱巡巡（1997-），女，博士研究生，研究方向为地表环境过程与生态响应. E-mail: 1260469240@qq.com
通讯作者：曹广超. E-mail: caoguangchao@126.com

赖。多年来，由于青海云杉林在涵养水源作用极强而受到诸多学者的关注。目前，对祁连山不同海拔的青海云杉的研究多集中于其凋落物分解和生长过程变化及其对环境因子的响应[15]等方面，了解其上下层碳密度变化规律对于正确评估森林生态系统碳循环具有重大意义，且有研究表明，当海拔在2800~3100 m范围内青海云杉幼树生物量碳最高[16]，而祁连山南坡阿咪东索小流域青海云杉正好生长于此范围内，因此，调查分析该区域内青海云杉林碳密度有利于该树种的科学管理。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山南坡地处青海省东北缘，地理位置为98°08′13″~102°38′16″E，37°03′17″~39°05′56″N，海拔2286~5210 m，总面积2.4×10⁴ km²。研究区土壤呈弱碱性，该区年日照时数长，约为2200~2900 h，年气温在−37.1~30.5 ℃之间，雨热同期、干湿分明，年均降水量400 mm左右，集中在6—8月，气温和降水均具有明显的水平和垂直梯度差异。区内阿咪东索小流域位于祁连县城东南2 km处，呈东西走向的山谷，海拔2800~4667 m之间，区内岩性主要为酸性火成岩、砾岩及砂岩，森林主要建群种为青海云杉，呈斑块状分布于阴坡、半阴坡，零星分布有祁连圆柏，大多分布在海拔2900~3200 m范围，多为中龄的单层纯林[17]。

1.2 样地设置

2020年6—8月，根据青海云杉林在祁连山南坡阿咪东索小流域的分布状况，在保证环境条件（如坡度、坡向）基本一致的基础上，于海拔2900 ~ 3200 m范围内，按100 m海拔梯度设置样地，共4个海拔梯度，每个海拔梯度设置3个样地，样地大小均为20 m×20 m，共计12个样地。对样方中胸径≥3 cm的青海云杉进行每木检尺，调查因子主要包括郁闭度、胸径、树高等指标。样地描述见表1。

1.3 样品采集测定

在每个样地内，顺坡向按照随机采样法选取3个1 m×1 m的取样点，用直径为5 cm的土钻钻取0~50 cm的土壤样品，间隔均为10 cm，每个海拔梯度采集土壤样品15个，共计采集样品60个，另每个样点分层采集环刀土样测定容重。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。

1.4 数据分析

1.4.1 生物量及碳密度计算 本文采取生物量模型，青海云杉单株各器官生物量相对生长方程[18]如表2。

样地总生物量由样地内所有树木生物量累加得到[19]（W，t·hm⁻²），包括乔木层生物量。公式如下：

$$W = 10\times\sum_{i=1}^{n}W_{Ti}/s \tag{1}$$

式中：W_{Ti}为第i株树的生物量（kg）；S为样地面积（m²）；n为样地内树木株数；i为样地内第i株青海云杉。

乔木层碳密度和森林生态系统碳密度计算参照曾立雄等[20]的研究，即乔木层碳密度由单位面积上乔木层生物量乘以转换系数（即干物质的碳质量分数）0.52得到，森林生态系统碳密度由单位面积上

表1 样地描述

Tab. 1 Plot description

林分类型	海拔/m	样地数量/个	郁闭度	平均胸径/cm	平均株高/m	样地株数/株	样品数量/个
青海云杉 *Picea crassifolia*	2900	3	0.6	35.45	12.45	14	15
	3000	3	0.7	23.7	11.2	24	15
	3100	3	0.7	27.55	11.45	11	15
	3200	3	0.5	20.45	10.62	9	15

表2 单株水平上各器官生物量相对生长方程

Tab. 2 Relative growth equation of biomass of each organ

器官	相对生长方程	R^2	器官	相对生长方程	R^2
干	W_S=0.957×$D^{1.591}$	0.876	根	W_R=0.220×$D^{1.858}$	0.967
叶	W_L=0.001×$D^{3.067}$	0.722	总量	W_T=0.959×$D^{1.803}$	0.953
枝	W_B=0.012×$D^{2.448}$	0.815			

注：D为胸径；W_T为单株总生物量。

森林乔木层和土壤层平均碳密度累计得到，由于青海云杉林灌草本层和枯落物层碳密度所占整体碳密度比例较少，因此本研究忽略灌草本层和枯落物层碳密度的计算。

1.4.2　*土壤碳密度计算*　由土壤有机碳含量计算出不同土层有机碳密度（*SOCD*），公式如下[21]：

$$SOCD_d = C_d \times D_d \times E_d \times (1 - G_d)/100 \qquad (2)$$

式中：$SOCD_d$为第d土层土壤有机碳密度($kg \cdot m^{-2}$)；C_d为第d层土壤有机碳含量($g \cdot kg^{-1}$)；D_d为第d层土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)；E_d为第d层土层厚度(cm)；G_d为第d层土壤中直径＞2 mm的石砾含量百分比（%）。

1.4.3　*数据处理*　采用SPSS 26进行数据统计分析，用One-way ANOVA，LSD法进行显著性多重比较。采用Origin 2022b进行绘制图表。

2　结果与分析

2.1　不同海拔青海云杉林生物量分配格局及其密度变化特征

由表3可知，研究区青海云杉树干、叶、枝和根生物量平均值为183.76 kg、28.52 kg、41.47 kg和103.52 kg，变化范围分别为116.48~279.62 kg、10.47~56.77 kg、19.4~74.72 kg和59.94~166.71 kg；样地总生物量及乔木层碳密度平均值分别为135.59 $t \cdot hm^{-2}$和70.51 $t \cdot hm^{-2}$，变化范围分别在52.94~208.14 $t \cdot hm^{-2}$和27.35~108.23 $t \cdot hm^{-2}$。海拔2900 m处样地总生物量显著大于海拔3100 m及海拔3200 m处（$P < 0.05$），海拔3000 m处样地总生物量显著大于海拔3200 m处（$P < 0.05$），随着海拔升高呈递减趋势。乔木层碳密度随海拔升高而降低。从生物量分配格局来看，均表现为：干＞根＞枝＞叶，且干、根、枝和叶分别占总生物量的48.39%~56.46%、28.85%~29.15%、9.4%~12.93%和5.08%~9.82%，随海拔升高，呈先降低后升高再降低的波动变化趋势。

2.2　不同海拔青海云杉林土壤有机碳含量及其密度变化特征

由图1所示，研究区不同海拔青海云杉林土壤有机碳含量变化范围为11.37~82.49 $g \cdot kg^{-1}$，平均值为46.11 $g \cdot kg^{-1}$。随海拔升高，土壤有机碳含量呈先升高后降低再升高的波动变化，最大值出现在3000 m处，最小值出现在海拔3100 m处。在不同海拔0~50 cm土层，土壤有机碳含量最大值均出现在0~10 cm，最小值均出现在40~50 cm，且在海拔2900 m处0~10 cm土层土壤有机碳含量显著高于40~50 cm土层（$P < 0.05$）；在海拔3100 m处，表层土壤有机碳含量显著高于深层（$P < 0.05$），其余海拔不同土层差异不显著（$P > 0.05$）。在海拔3200 m处，土壤有机碳含量随土层加深呈现出先降低后增加再降低的波动趋势；其余海拔土壤有机碳含量均随土层加深而递减。

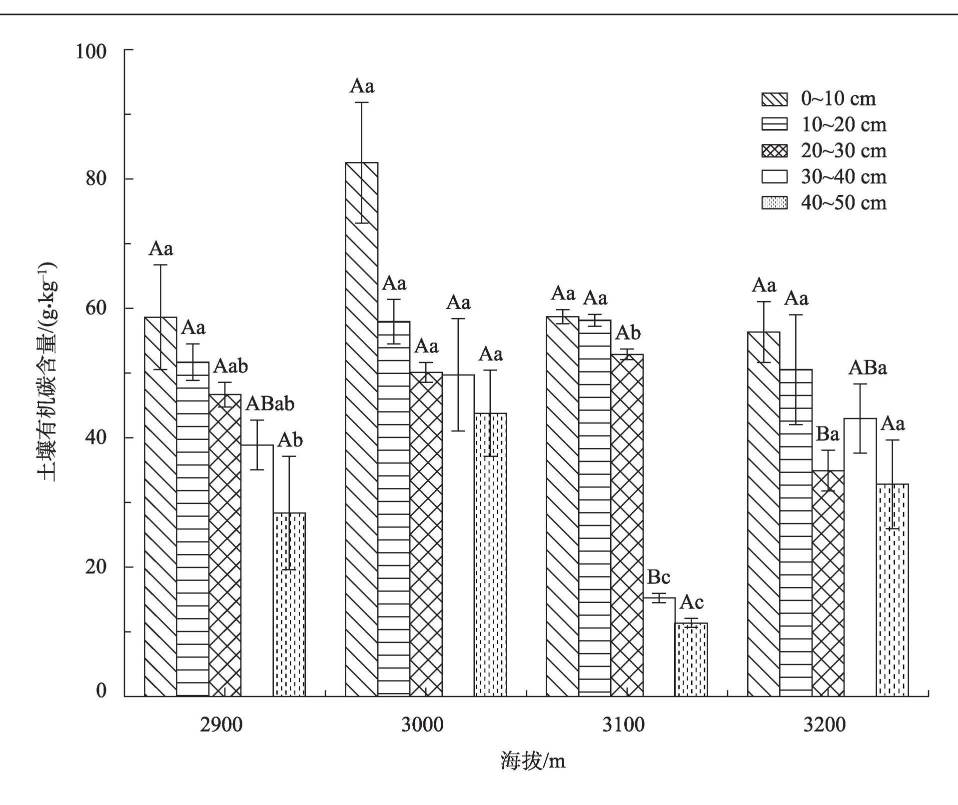
由表4可知，研究区青海云杉林0~50 cm土层土壤有机碳密度平均值为154.01 $t \cdot hm^{-2}$，变化范围为134.33~169.36 $t \cdot hm^{-2}$，随着海拔升高先降低后升高，最大值出现在海拔3100 m处，最小值出现在海拔3000 m处。在不同海拔同一土层，海拔3100 m处10~20 cm土层土壤有机碳密度显著大于海拔2900 m和海拔3000 m处（$P < 0.05$），其余土层各海拔间土壤有机碳密度差异不显著（$P > 0.05$）。在同一海拔不同土层，土壤表层（0~10 cm）有机碳密度均大于深层（40~50 cm）土壤。在海拔2900 m和3000 m处，土壤有机碳密度随土层的加深呈先降低后增加再降低的波动变化趋势，不同土层土壤有机碳密度差异不显著（$P > 0.05$）；在海拔3100 m处，随土层的加

表3　不同海拔青海云杉林生物量分配格局及其乔木层碳密度

Tab. 3　Biomass distribution pattern and arbor layer carbon density in Qinghai spruce forest at different altitudes

海拔/m	生物量/kg				总生物量	乔木层碳密度
	干	叶	枝	根	/($t \cdot hm^{-2}$)	/($t \cdot hm^{-2}$)
2900	279.62±14.42A	56.77±5.63A	74.72±5.92A	166.71±10.03A	208.14±2.71A	108.23±1.41A
3000	147.46±11.86AB	16.59±2.56B	27.96±3.45B	78.99±7.41AB	177.5±15.76AB	92.3±10.27AB
3100	191.53±22.12AB	30.24±8.21AB	43.78±12.11AB	108.42±13.21AB	104.11±12.06BC	54.14±6.69BC
3200	116.48±1.36B	10.47±0.24B	19.4±0.35B	59.94±0.82B	52.6±3.46C	27.35±1.8C
平均值	183.76±26.62	28.52±7.65	41.47±9.09	103.52±17.47	135.59±24.15	70.51±12.56

注：数据为平均值±标准误；不同大写字母表示不同海拔梯度差异显著（$P < 0.05$）。



注:不同大写字母表示不同海拔同一土层差异显著,不同小写字母表示同一海拔不同土层差异显著($P<0.05$)。

图1 不同海拔各土层土壤有机碳含量

Fig. 1 Characteristics of soil organic carbon content in different soil layers at different altitudes

表4 不同海拔各土层土壤有机碳密度

Tab. 4 Distribution characteristics of soil organic carbon density in different soil layers at different altitudes layers

海拔/m	不同土层/cm					合计/(t·hm⁻²)
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	
2900	34.55±3.85Aa	27.8±5.44Ba	35.37±5.63Aa	27.02±6.43Aa	19.71±1.08Aa	144.49±3.07A
3000	33.82±5.2Aa	27.82±1.65Ba	22.54±0.69Aa	25.86±3.27Aa	24.28±0.59Aa	134.33±2.42A
3100	47.55±2.94Aab	53.51±1.12Aa	42.84±2.64Ab	16.46±1.11Ac	9±4.42Ac	169.36±5.98A
3200	32.18±0.18Aa	44.39±9.91ABa	27.12±1.04Aa	36.88±1.13Aa	27.27±5.96Aa	167.84±3.17A
平均值	37.03±3.27	38.38±4.7	31.97±3.76	26.55±3.49	20.07±3.57	154.01±9.57

注:数据为平均值±标准误;不同大写字母表示不同海拔同一土层差异显著,不同小写字母表示同一海拔不同土层差异显著($P<0.05$)。

深先增加后降低,10~20 cm 土层显著大于 20~30 cm、30~40 cm 及 40~50 cm 土层($P<0.05$);在海拔3200 m处,随土层的加深呈不规则波动变化,不同土层差异不显著($P>0.05$)。

2.3 不同海拔青海云杉林生态系统碳密度变化特征

如图2所示,研究区不同海拔青海云杉林生态系统碳密度为224.51 t·hm⁻²,其中乔木层和土壤层碳密度分别占总碳密度的30.5%和69.5%;随着海拔升高,青海云杉林生态系统碳密度呈现出下降的变化趋势。

研究区海拔2900~3200 m范围内青海云杉林生态系统碳密度的分配比例如图3所示,乔木层碳密

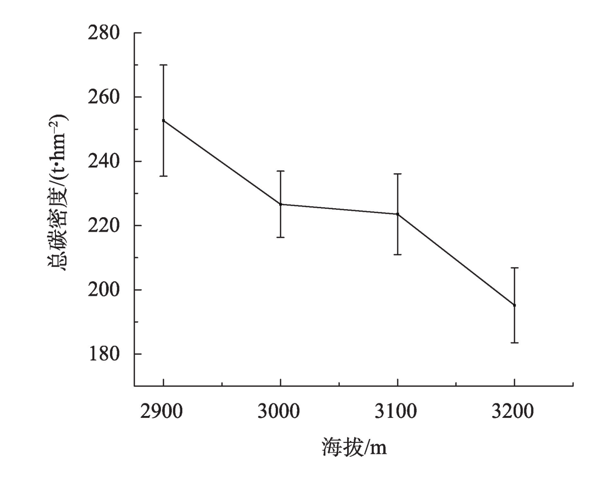


图2 不同海拔总碳密度

Fig. 2 Total carbon density at different altitudes

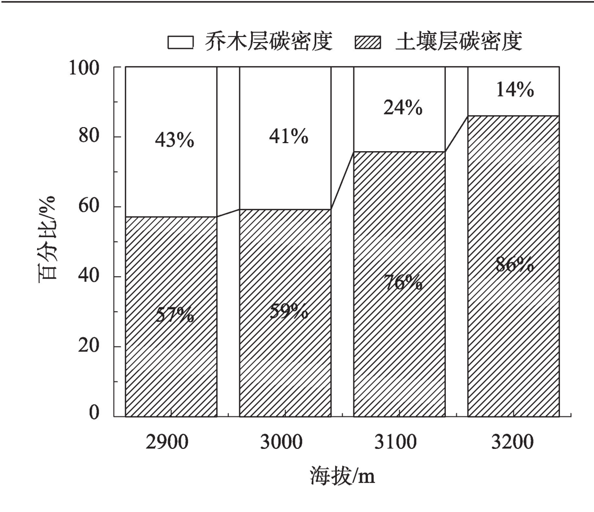


图3 不同海拔乔木层和土壤层碳密度比例分布

Fig. 3 Proportional distribution of carbon density in tree layer and soil layer at different altitudes

度占比为14%~43%,土壤层占为57%~86%;随海拔上升,土壤碳密度占森林生态系统碳密度比增多,乔木层占比减少。

2.4 海拔与青海云杉林碳密度相关指标间的相关性

如表5所示,海拔高度与青海云杉平均胸径和乔木层碳密度存在极显著负相关关系($P<0.01$),与青海云杉林郁闭度存在显著负相关关系($P<0.05$),与土壤有机碳密度及土壤有机碳含量关系不显著($P>0.05$)。

3 讨 论

祁连山南坡阿咪东索小流域青海云杉林乔木层总生物量平均值为135.59 t·hm^{-2},变化范围为52.94~208.14 t·hm^{-2},与张雷等[19]在祁连山北坡的研究结果(128.61 t·hm^{-2})及刘兴聪等[22]在祁连山哈溪林场(132.9 t·hm^{-2})的研究结果相近,略高于曾立雄等[20]在祁连山西水林区的研究结果(115.83 t·hm^{-2}),略低于祁连山平均值(169.8 t·hm^{-2})[23]和全国平均值(156.66 t·hm^{-2})[24]。从宏观上看,林分质量差异对青海云杉林乔木层总生物量的影响较大[20],不同采样地的环境异质性影响树木的生长,但这种差异往往会在一定的范围内。青海云杉的器官生物量在各海拔处均表现为:干>根>枝>叶,这与诸多研究结果相一致[18],青海云杉树器官分配格局与自身大小及生长环境(如气候、土壤质地等)密切相关,发达的根系是其生存在相对恶劣的环境中的前提与保障。

随着海拔升高,研究区青海云杉样地总生物量呈现出递减的趋势,这与张立杰等[25]在祁连山的研究结果相类似。众多学者认为,祁连山地区海拔的落差造就了其水热条件空间差异性较大[26],在一定海拔范围内随着海拔升高降水增多[27],但随之低气温成为青海云杉树种更新和分布的另一胁迫因素,低温限制碳水化合物的形成[28]。本文研究结果海拔与青海云杉平均胸径和乔木层碳密度存在极显著负相关关系,与青海云杉林郁闭度存在显著负相关关系也说明了这一点。Tian 等[29]研究表明,40 cm土层处土壤温度在0 ℃以上时,青海云杉才开始能生长,因此在海拔2900~3200 m范围内,随着海拔升高,研究区青海云杉样地总生物量受温度影响递减。生物量和固定值碳系数换算得到乔木层碳密度[20],二者呈现出一致的变化规律。

森林土壤碳主要来源于凋落物的累积与分解[30-31]。本研究中青海云杉林土壤有机碳密度平均值(154.01 t·hm^{-2})在全国土壤全剖面有机碳密度的范围(1.19~176.46 kg·m^{2})内[32],略低于曾立雄等[20]在祁连山西水林区的研究结果(194.62 t·hm^{-2})。祁连山南坡阿咪东索小流域青海云杉林生长范围在2900~3200 m,土壤有机碳含量受海拔带来的气候差异等环境因素以及土壤立地条件的差异的共同

表5 海拔与青海云杉林碳密度相关指标间的相关性

Tab. 5 Correlation between altitude and carbon density of *Picea crassifolia* forest

	海拔	平均胸径	郁闭度	乔木层碳密度	土壤有机碳密度	土壤有机碳含量
海拔	1					
平均胸径	−0.878**	1				
郁闭度	−0.765*	0.518	1			
乔木层碳密度	−0.976**	0.905**	0.735*	1		
土壤有机碳密度	0.39	−0.214	−0.361	−0.429	1	
土壤有机碳含量	−0.342	0.119	0.602	0.381	0.024**	1

注:*表示$P<0.05$水平上显著,**表示$P<0.01$水平上显著。

制约,具有高度的空间异质性[33]。此外,随着海拔梯度的升高,土壤有机碳含量及其密度呈波动变化趋势,与前人研究结果类似[27,34],这是由海拔高度的差异引起气候、温度、降雨量、生物等因素的改变,土壤有机碳含量及密度高低是这些因素综合作用的结果[31]。

不同海拔青海云杉的碳密度受水热条件和土壤质地等的共同影响,本研究结果表明,祁连山南坡阿咪东索小流域青海云杉林生态系统碳密度为224.51 t·hm^{-2},与周玉荣等[35]研究结果(258.83 t·hm^{-2})相近,其中,乔木层和土壤层分别占比为30.5%和69.5%,与王金叶等[36]采用收割法测定标准木各器官生物量建立生物量相对模型的研究结果(林分碳密度占30.39%,土壤碳密度占69.61%)极为接近,同时也说明土壤碳储量仍是森林生态系统最重要的碳库[37]。

4 结 论

通过对祁连山南坡阿咪东索小流域内青海云杉典型林分密度随海拔的变化特征进行了研究,得出以下结论:

(1) 研究区青海云杉样地总生物量平均值为135.59 t·hm^{-2},随着海拔升高,样地总生物量呈现出递减的趋势,各海拔处器官生物量均表现为:干>根>枝>叶。

(2) 研究区青海云杉林植被碳密度平均值为70.51 t·hm^{-2},0~50 cm土层土壤有机碳密度平均值为154.01 t·hm^{-2},生态系统碳密度为224.51 t·hm^{-2},其中乔木层和土壤层碳密度分别占总碳密度的30.5%和69.5%;随海拔上升,土壤碳密度占碳密度比增多,乔木层占比减少。土壤碳库仍是森林生态系统最重要的碳库,加强森林土壤碳的保护有利于森林碳库的贮存。

参考文献(References):

[1] Lai R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 1623–1627.

[2] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882): 1444–1449.

[3] 刘贤德, 赵维俊, 张学龙, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉林土壤养分和pH变化特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1013–1020. [Liu Xiande, Zhao Weijun, Zhang Xuelong, et al. Changes of soil nutrients and pH in Qinghai spruce forest in Pai Lu Gou Basin, Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 1013–1020.]

[4] 石仁娜·加汗, 张同文, 喻树龙, 等. 天山不同海拔雪岭云杉径向生长对气候变化的响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 327–338. [Shi Renna Jiahan, Zhang Tongwen, Yu Shulong, et al. Response of radial growth of spruce at different elevations to climate change in Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 327–338.]

[5] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 915–921. [Ma Chao, Zhou Jing, Liu Manqiang, et al. Effects of straw on soil nutrients and active organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 915–921.]

[6] Sauer T J, Cambardella C A, Brandle J R. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt[J]. Agroforestry Systems, 2007, 71(3): 163–174.

[7] 秦纪洪, 王琴, 孙辉. 川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5858–5864. [Qin Jihong, Wang Qin, Sun Hui. Changes of surface organic carbon and active components along altitudinal gradients in subalpine and alpine soils of western Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5858–5864.]

[8] 熊华, 于飞, 谷晓平, 等. 梵净山不同森林植被生物量、净生产量、碳储量及空间分布特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 264–273. [Xiong Hua, Yu Fei, Gu Xiaoping, et al. Biomass, net production, carbon storage and spatial distribution of different forest vegetation in Fanjing Mountain[J]. Journal of Ecology and Environment, 2021, 30(2): 264–273.]

[9] 秦艳培, 徐少君, 田耀武. 黄河流域河南段植被和土壤及其碳密度空间分异研究[J]. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1745–1753. [Qin Yanpei, Xu Shaojun, Tian Yaowu. Spatial differentiation of vegetation, soil and carbon density in the Henan section of the Yellow River Basin[J]. Journal of Eco-Environment, 2022, 31(9): 1745–1753.]

[10] 任德智, 廖兴勇, 肖前刚, 等. 成都市森林植被碳储量及空间分布格局[J]. 西部林业科学, 2021, 50(3): 74–81. [Ren Dezhi, Liao Xingyong, Xiao Qiangang, et al. Carbon storage and spatial distribution pattern of forest vegetation in Chengdu[J]. Journal of Western Forestry Science, 2021, 50(3): 74–81.]

[11] 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 629–639. [Zhang Yanjun, Yu Yaochuang, Niu Junjie, et al. Altitudinal gradient pattern of soil organic carbon storage in the Northern Slope of Taibai Mountain, Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 629–639.]

[12] 黄斌, 王泉泉, 李定强, 等. 南岭山地土壤有机碳及组分海拔梯度变化特征[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 374–383. [Huang Bin,

Wang Quanquan, Li Dingqiang, et al. Changes of soil organic carbon and its components in elevation gradient in Nanling Mountain [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 374-383.]

[13] Zhu B, Wang X P, Fang J Y, et al. Altitudinal changes in carbon storage of temperate forests on Mt Changbai, Northeast China[J]. Journal of Plant Research, 2010, 123(4): 439-452.

[14] 高黎明, 张乐乐. 青海湖流域植被盖度时空变化研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1318-1329. [Gao Liming, Zhang Lele. Temporal and spatial variations of vegetation coverage in Qinghai Lake Basin[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(9): 1318-1329.]

[15] 石建周, 刘贤德, 田青, 等.祁连山中部青海云杉年内径向生长季节变化及其对环境因子的响应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 261-267. [Shi Jianzhou, Liu Xiande, Tian Qing, et al. Annual radial seasonal variation of *Picea* Qinghai and its response to environmental factors in the central Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 261-267.]

[16] 王清涛, 赵传燕, 王小平, 等. 基于FAREAST模型的青海云杉中-幼龄林生物量碳沿海拔梯度分布特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1316-1326. [Wang Qingtao, Zhao Chuanyan, Wang Xiaoping, et al. Biomass carbon distribution along altitude gradient in middle-young Spruce forest based on FAREAST model[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1316-1326.]

[17] 段荣贵. 祁连山南坡青海云杉林的分布规律[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 74-79. [Duan Ronggui. Distribution of Qinghai spruce forest on the southern slope of Qilian Mountains [J]. Journal of Qinghai University (Natural Science Edition), 2012, 30(3): 74-79.]

[18] 孟延山, 孟俐君, 王静洁, 等. 青海省2种主要树种的生物量分配格局和单木生物量模型[J]. 西部林业科学, 2019, 48(6): 21-28. [Meng Yanshan, Meng Lijun, Wang Jingjie, et al. Biomass distribution pattern and biomass model of two main tree species in Qinghai Province[J]. Western Forestry Science, 2019, 48(6): 21-28.]

[19] 张雷, 于澎涛, 王彦辉, 等. 祁连山北坡青海云杉中龄林生物量随海拔的变化[J]. 林业科学, 2015, 51(8): 1-7. [Zhang Lei, Yu Pengtao, Wang Yanhui, et al. Biomass changes of Qinghai spruce with altitude in mid-life forest on Northern Slope of Qilian Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(8): 1-7.]

[20] 曾立雄, 雷蕾, 王晓荣, 等. 海拔梯度对祁连山青海云杉林乔木层和土壤层碳密度的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7168-7177. [Zeng Lixiong, Lei Lei, Wang Xiaorong, et al. Effects of altitude gradient on carbon density in tree layer and soil layer of Spruce forest in Qinghai, Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7168-7177.]

[21] 尤海舟, 毕君, 王超, 等. 河北小五台山不同海拔白桦林土壤有机碳密度分布特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 432-437. [You Haizhou, Bi Jun, Wang Chao, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon density in birch forest at different elevations in Xiaowutai Mountain, Hebei Province[J]. Journal of Ecology and Environment, 2018, 27(3): 432-437.]

[22] 刘兴聪. 祁连山哈溪林场青海云杉林生物量的测定[J]. 甘肃林业科技, 1992(1): 7-10. [Liu Xingcong. Biomass determination of Qinghai Spruce forest in Haxi forest farm in Qilian Mountains[J]. Gansu Forestry Science and Technology, 1992(1): 7-10.]

[23] 许仲林. 祁连山青海云杉林地上生物量潜在碳储量估算[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. [Xu Zhonglin. Estimation of Aboveground Biomass Potential Carbon Storage in Qinghai Spruce Forest in Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011.]

[24] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508. [Fang Jingyun, Liu Guohua, Xu Songling. Biomass and net production of forest vegetation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(5): 497-508.]

[25] 张立杰, 蒋志荣. 青海云杉种群分布格局沿海拔梯度分形特征的变化[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 64-66. [Zhang Lijie, Jiang Zhirong. Fractal characteristics of spruce population distribution pattern along altitude gradient in Qinghai Province[J]. Journal of Northwest Forestry College, 2006, 21(2): 64-66.]

[26] 彭守璋, 赵传燕, 郑祥霖, 等. 祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1689-1694. [Peng Shouzhang, Zhao Chuanyan, Zheng Xianglin, et al. Spatial distribution of biomass and carbon storage of Spruce forest in Qinghai, Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1689-1694.]

[27] 薛晓娟, 李英年, 杜明远, 等. 祁连山东段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 642-649. [Xue Xiaojuan, Li Yingnian, Du Mingyuan, et al. Distribution of soil organic matter and total nitrogen at different elevations at the southern foot of the eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4): 642-649.]

[28] Zhao C Y, Nan Z R, Cheng G D, et al. GIS-assisted modeling of the spatial distribution of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the Qilian Mountains, northwestern China based on biophysical parameters[J]. Ecological Modeling, 2006, 191: 487-500.

[29] Tian Q Y, He Z B, Xiao S C, et al. Response of stem radial growth of Qinghai spruce(*Picea crassifolia*) to environmental factors in the Qilian Mountains of China[J]. Dendrochronologia, 2017, 44: 76-83.

[30] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 675-687. [Zhang Guangshuai, Deng Haojun, Du Kun, et al. Stoichiometric characteristics of soil at different elevations in an area with frequent debris flow: A case study of Xiaojiang Basin, Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 675-687.]

[31] 邱巡巡, 曹广超, 张卓, 等. 高寒农田土壤有机碳和全氮密度垂直分布特征及其与海拔的关系[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 623-630. [Qiu Xunxun, Cao Guangchao, Zhang Zhuo, et al. Vertical

distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen density in alpine farmland and their relationship with altitude [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3): 623-630.]

[32] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43. [Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen, et al. Estimation and spatial distribution of soil organic carbon density and storage in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 35-43.]

[33] 秦海龙, 付旋旋, 卢瑛, 等. 广西猫儿山不同海拔土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 711-717. [Qin Hailong, Fu Xuanxuan, Lu Ying, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus at different elevations in Maoer Mountain, Guangxi[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 711-717.]

[34] 王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 等. 三江源地区主要草地类型土壤碳氮沿海拔变化特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3): 441-449. [Wang Changting, Long Ruijun, Cao Guangmin, et al. Characteristics and influencing factors of soil carbon and nitrogen in main grassland types in the Headwaters of Three Rivers[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(3): 441-449.]

[35] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522. [Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and balance in the main forest ecosystem[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(5): 518-522.]

[36] 王金叶, 车克钧, 蒋志荣. 祁连山青海云杉林碳平衡研究[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(1): 9-14. [Wang Jinye, Che Kejun, Jiang Zhirong. Study on carbon balance of spruce forest in Qilian Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2000, 15(1): 9-14.]

[37] 申家朋, 张文辉, 李彦华, 等. 陇东黄土高原沟壑区刺槐和油松人工林的生物量和碳密度及其分配规律[J]. 林业科学, 2015, 51(4): 1-7. [Shen Jiapeng, Zhang Wenhui, Li Yanhua, et al. Biomass and carbon density of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantations in the Loess Plateau of eastern Gansu Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(4): 1-7.]

Distribution characteristics of carbon density in the arbor and soil layers of Qinghai spruce forest on the southern slope of Qilian Mountains with altitude

QIU Xunxun[1,2], CAO Guangchao[2,3], ZHANG Jinhu[1,2], ZHANG Zhuo[4], LIU Menglin[1,2]

(1. College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Qinghai Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Process, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Key Laboratory of Earth Surface Processes and Ecological Conservation of the Ministry of Education, Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810008, Qinghai, China; 4. Kizilsu Ecological Environment Monitoring Station in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Artush 845350, Xinjiang, China)

Abstract: Forest biomass is the basis for studying forest primary productivity, and its carbon density is a crucial indicator for evaluating the structure and function of forest ecosystem. To study changes in the stand density of Qinghai spruce with altitude in Amidongsoe small watershed on the southern slope of Qilian Mountains, a biomass model was used to calculate the carbon density of arbor and soil layers along an altitude gradient of 2900-3200 m at different altitudes. The aim of this study was to gather basic data for estimating carbon storage in spruce forests in the Qilian Mountains and Qinghai Province. The results demonstrated that the average value of total biomass in the study area was 135.59 $t\cdot hm^{-2}$ and the total biomass decreased as the altitude increased. The average carbon density of tree layer was 70.51 $t\cdot hm^{-2}$, and the average organic carbon density of the 0-50 cm soil layer was 154.01 $t\cdot hm^{-2}$. As the altitude increased, the carbon density of the tree layer exhibited a decreasing trend, and the soil organic carbon density of the tree layer initially decreased and then increased. At different elevations, the carbon density of spruce forest ecosystem was 224.51 $t\cdot hm^{-2}$, with the carbon density of the tree and soil layers accounting for 30.5% and 69.5% of the total carbon density, respectively. The layers showed a decreasing trend as the altitude increased. Protecting forest soil is crucial for maintaining ecological balance, as the forest soil carbon pool represents a considerable proportion of the total carbon density.

Keywords: southern slope of Qilian Mountains; Qinghai spruce forest; biomass; carbon density